溶接の冷え方は、厚い板では入熱に比例し、薄い板では入熱の二乗で効く

— 800 ℃ から 500 ℃ まで冷える時間は、厚い板の式で入熱 2000 J/mm に 5.101120 秒、8000 J/mm に 20.404480 秒 — 分離子は、熱が逃げる向きが三次元か二次元か — [論文756]

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)
Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan｜山岸勇輝ラボ
2026年9月

— From thinking to syncing. —

要旨

溶接の品質は、溶けた部分が 800 ℃ から 500 ℃ まで冷える時間で大きく変わる。速すぎても遅すぎても悪い。その時間を入熱がどう決めるかを、厚い板と薄い板で数える。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、厚い板では、冷える時間は入熱に比例する——1000・2000・8000 J/mm で 2.550560・5.101120・20.404480 秒（第2節）。 第二に、薄い板では、入熱の二乗で効く——板厚 10 mm で 1000 J/mm に 9.112118 秒、2000 J/mm に 36.448473 秒（第2節）。 第三に、境の板厚は入熱で動く——1000 J/mm で 18.901310 mm、2000 J/mm で 26.730489 mm、8000 J/mm で 53.460977 mm（第2節）。 第四に、これが本稿の芯である。同じ時間の窓が、板厚で入熱の幅を変える——5〜20 秒に入る入熱の幅は、厚い板で 4.000000 倍、板厚 10 mm で 2.000000 倍（第3節）。 第五に、窓の位置も大きくずれる——厚い板で 1960.353816〜7841.415263 J/mm、板厚 10 mm で 740.756260〜1481.512519 J/mm（第3節）。 第六に、分離子は、熱が逃げる向きが三次元か二次元かである——「入熱をいくつにすればよいか」は、板厚を言うまで答が無い（第4節）。 キーワード：溶接の入熱、冷却時間、板厚、熱の逃げる次元、ローゼンタールの解、入熱の窓。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——動く点熱源と線熱源の温度場（ローゼンタールの解）、そこから出る 800 ℃ から 500 ℃ までの冷却時間の厚い板と薄い板の式、その時間で溶接部の良否を見る考え方は、いずれも既知である（ローゼンタール 1946、イースタリング 1992）。窓を目安として置く——5〜20 秒は比べるための目安であり、鋼種や規格ごとの基準は主張しない。組織を計算しない——速すぎれば硬く脆く、遅すぎれば軟らかく弱いことは名前を挙げるにとどめ、硬さや組織は計算しない。条件を削る——熱効率、予熱、継手の形、溶け込みの形は入れない。入熱は板に入った熱として置く。材料定数を固定する——熱伝導率と体積熱容量は代表値で、温度に依らないと置く。施工を勧めない——どの条件で溶接すべきかは述べない。既刊との関係：論文562 は、残留応力の上限を決めているのが温度ではなく降伏であることを示した——その射程注記は「予熱も後熱も入熱管理も述べない」と明記していた。そこでは冷えたあとに残る応力の上限を扱い、温度差を振っても答が動かなかった。ここでは冷える途中の速さを入熱が決め、その効き方の冪が板厚で一乗から二乗に変わる。冷えたあとの上限と、冷える途中の速さになる。加えたのは、入熱ごとに二つの式の時間と境の板厚を並べたこと、同じ窓に入る入熱の幅が厚い板で 4.000000 倍、板厚 10 mm で 2.000000 倍になることを示したこと、境の板厚で二つの式が一致することを確かめたこと、分離子を「熱の逃げる向きが三次元か二次元か」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：単位長さあたりの入熱を q'、板厚を d、熱伝導率を λ、体積熱容量を ρc、予熱の温度を T_0 とする。厚い板では熱が三次元に、薄い板では板の面内の二次元に逃げる。800 ℃ から 500 ℃ まで冷える時間は次の二式になり、両者が一致する板厚が境 d_t である。

$$t_{3\mathrm{D}} = \frac{q'}{2\pi\lambda}\left(\frac{1}{500-T_0}-\frac{1}{800-T_0}\right), \qquad t_{2\mathrm{D}} = \frac{(q'/d)^2}{4\pi\lambda\rho c}\left(\frac{1}{(500-T_0)^2}-\frac{1}{(800-T_0)^2}\right)$$

$$d_t = \sqrt{\frac{q'}{2\rho c}\left(\frac{1}{500-T_0}+\frac{1}{800-T_0}\right)}$$

$\lambda = 50\ \mathrm{W/(m\,K)}$、$\rho c = 4.710\times10^{6}\ \mathrm{J/(m^3\,K)}$、$T_0 = 20\ ^\circ\mathrm{C}$ と置く。

問い：冷える時間を目安の窓に入れるには、入熱をいくつにすればよいのか。

2. 厚い板では一乗、薄い板では二乗

計算 2.1：厚い板の式で、入熱ごとに冷える時間と境の板厚を出した。

入熱	冷える時間（厚い板）	境の板厚
1000 J/mm	2.550560 秒	18.901310 mm
2000 J/mm	5.101120 秒	26.730489 mm
4000 J/mm	10.202240 秒	37.802620 mm
8000 J/mm	20.404480 秒	53.460977 mm

計算 2.2：板厚 10 mm で、薄い板の式の時間を厚い板の式と並べた。

入熱	薄い板の式（10 mm）	厚い板の式
500 J/mm	2.278030 秒	1.275280 秒
1000 J/mm	9.112118 秒	2.550560 秒
2000 J/mm	36.448473 秒	5.101120 秒

> **観察 2.3**
>
> 厚い板では入熱 2 倍で時間 2 倍、薄い板では 4 倍になる。薄い板では熱が逃げる向きが一つ減り、入熱が板厚で割られて二乗で効く——同じ入熱の変化が、板によって違う冪で時間に届く。

> **観察 2.4**
>
> 境の板厚は入熱とともに厚くなる。2000 J/mm の境は 26.730489 mm で、境の板厚では二つの式の差は 8.882×10^{-16} 秒しか無い——板厚 10 mm はこの入熱では薄い板の側で、時間は厚い板の式の 5.101120 秒ではなく 36.448473 秒になる。

3. 同じ窓が、板厚で入熱の幅を変える

計算 3.1：目安の窓 5〜20 秒に入る入熱を、二つの式で逆に解いた。

板	窓に入る入熱	幅
厚い板	**1960.353816**〜**7841.415263** J/mm	**4.000000** 倍
板厚 **10** mm	**740.756260**〜**1481.512519** J/mm	**2.000000** 倍

観察 3.2

これが本稿の芯である。同じ時間の窓が、厚い板では入熱の幅 **4.000000** 倍、板厚 **10 mm** では **2.000000** 倍になる。時間の幅 **4** 倍が、一乗なら入熱でも **4** 倍、二乗なら入熱では平方根の **2** 倍にしかならない——薄い板ほど、入熱を合わせる余裕が狭い。

観察 3.3

窓の位置も大きくずれる。厚い板で **1960.353816 J/mm** からの窓が、板厚 **10 mm** では **740.756260 J/mm** から **1481.512519 J/mm** に移り、厚い板の窓の下端にも届かない——同じ入熱の数字を、板が変わっても使い回すことはできない。

4. 分離子

観察 4.1

分離子は、熱が逃げる向きが三次元か二次元か——板厚が境の板厚より厚いか薄いかである。三次元なら冷える時間は入熱の一乗、二次元なら二乗で効く——「入熱をいくつにすればよいか」は、板厚を言うまで答が無い。

観察 4.2

論文**562** と並べる。**562** は、冷えたあとに残る応力の上限を降伏が決め、入熱管理は述べないと明記した——ここは冷える途中の速さを数え、入熱の効き方の冪が板厚で変わることを示した。冷えたあとの上限と、冷える途中の速さである。

> **観察 4.3**
>
> 言わないこと。窓は目安で、熱効率も予熱も継手の形も組織の計算も入れていない——示したのは、同じ窓に入る入熱の幅と位置が板厚で変わることである。

5. 点呼と結び

1. **2000 J/mm** で **5.101120** 秒（計算 2.1）：厚い板。
2. **8000 J/mm** で **20.404480** 秒（計算 2.1）：一乗。
3. 境の板厚 **26.730489 mm**（計算 2.1）：入熱で動く。
4. **10 mm** で **36.448473** 秒（計算 2.2）：薄い板。
5. **9.112118** 秒から **4** 倍（観察 2.3）：二乗。
6. 幅 **4.000000** 倍（計算 3.1）：厚い板の窓。
7. 幅 **2.000000** 倍（計算 3.1）：本稿の芯。
8. **1960.353816 J/mm** から（計算 3.1）：厚い板の下端。
9. **740.756260〜1481.512519 J/mm**（観察 3.3）：薄い板の窓。
10. 三次元か二次元か（観察 4.1）：分離子・論文**562**。

結び：溶接の冷え方は、厚い板では入熱に比例し、薄い板では入熱の二乗で効く。熱伝導率 **50 W/(m K)** と置くと、厚い板で **800 ℃** から **500 ℃** まで冷える時間は **2000 J/mm** で **5.101120** 秒、**8000 J/mm** で **20.404480** 秒と入熱に比例する——ところが板厚 **10 mm** では、同じ **2000 J/mm** で **36.448473** 秒かかり、入熱 **2** 倍で時間は **4** 倍になる。境の板厚は **2000 J/mm** で **26.730489 mm** で、入熱とともに厚くなる。目安の窓 **5〜20** 秒に入る入熱の幅は、厚い板で **4.000000** 倍、板厚 **10 mm** で **2.000000** 倍に狭まり、窓の位置も **1960.353816〜7841.415263 J/mm** から **740.756260〜1481.512519 J/mm** に移る——薄い板ほど入熱を合わせる余裕が狭く、同じ数字は使い回せない。分離子は、熱が逃げる向きが三次元か二次元かである——「入熱をいくつにすればよいか」は、板厚を言うまで答が無い。既刊との位置——論文**562** は冷えたあとの応力の上限を扱い、入熱管理は述べないと明記した。ここは冷える途中の速さを数えた。正直に言えば——窓は目安で、熱効率も予熱も継手の形も組織の計算も入れていない。

参考文献

1. Easterling, K. (1992). *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
2. Rosenthal, D. (1946). The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. *Transactions of the ASME*.

3. 山岸勇輝 (2026). 『残留応力の上限を決めているのは、温度ではなく降伏である』[論文562]. Zenodo. 10.5281/zenodo.23014250

— From thinking to syncing. —

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

© 2026 Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan · Licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)